

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

Обеспечение своевременности и достоверности доставки пользовательских данных, эффективность использования процессорных, буферных ресурсов и ресурсов пропускной способности, а также производительность сети в целом во многом определяются качеством решения маршрутных задач. Их решение производится путем расчета оптимальных в рамках выбранных критериев маршрутных таблиц, основу которых составляют маршрутные переменные, определяющие, в свою очередь, степень загруженности трактов передачи сети разноадресными абонентскими или транзитными трафиками. Обычно маршрутная таблица для i -го узла коммутации представляется в виде соответствующей матрицы

$$M_i = \|\varphi_{i,j}^k\|, i, j, k = \overline{1, N}, i \neq j, k \neq i,$$

где $\varphi_{i,j}^k$ - доля пропускной способности тракта передачи (i, j) , используемая для передачи данных от i -го узла коммутации к k -му узлу.

В зависимости от места и способа расчета маршрутных таблиц, а также от степени использования информации о состоянии сети методы маршрутизации подразделяются на статические, квазистатические и адаптивные (рис. 1).

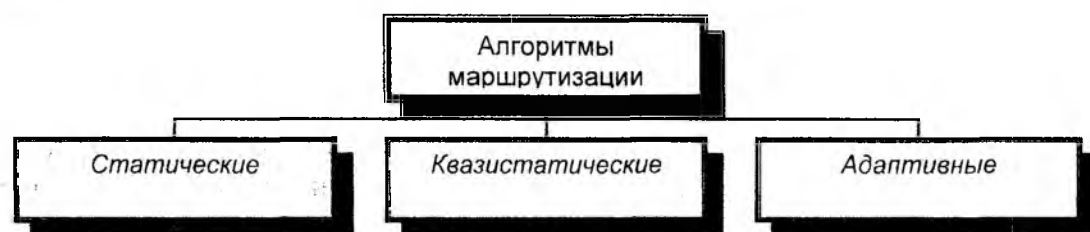


Рис. 1

Статическая маршрутизация предполагает использование на каждом маршрутизаторе ТПС фиксированных маршрутных таблиц, составляемых на этапе проектирования сети на основе информации о ее структуре, пропускной способности каналов связи, а также априорных данных о средней загрузке отдельных направлений сети. Алгоритмы (протоколы) статической маршрутизации просты в практической реализации и ориентированы на применение в сетях с невысокой динамикой изменения состояния сети. Примером подобного решения служит протокол маршрутизации IIS (Interim Interswitch Signaling Protocol), нашедший свое применение в сетях АТМ.

Квазистатическая маршрутизация обладает существенно большей степенью адаптируемости, подразумевая периодическую модификацию маршрутных таблиц с учетом изменяющихся условий функционирования сети. Квазистатические алгоритмы путем последовательных итераций обеспечивают маршрутизацию в ТКС при неизвестных, но фиксированных интенсивностях входных потоков. Качество маршрутизации в этом случае определяется скоростью изменения интенсивностей входных потоков и периодом перерасчета маршрутных таблиц.

Адаптивная маршрутизация подразумевает постоянный контроль состояния сети и характеристик входных потоков и обеспечивает постоянную коррекцию маршрутных таблиц в соответствии с изменениями состояния сети. При этом достигается наилучшее качество решения маршрутных задач. Однако реализация адаптивной стратегии маршрутизации требует передачи в рамках сети максимального по сравнению с другими подходами объема служеб-

ной информации о ее состоянии. В свою очередь качество адаптивной маршрутизации определяется полнотой и достоверностью такой информации. Протоколы OSPF (Open Short Patch First) и PNNI (Private Network-to-Network Interface) как представители адаптивных решений маршрутных задач в настоящее время широко используются, соответственно, в масштабных IP- и АТМ-сетях.

Современные телекоммуникационные системы характеризуются высоким динамизмом протекающего в сети процесса информационного обмена, стохастичным поступлением пользовательских запросов на обслуживание, что приводит к необходимости оперативного отслеживания состояния сети (загрузка буферов очереди, трактов передачи информации, оценка интенсивности абонентской нагрузки и др.). Решение этой важности задачи предполагает поиск комплексного подхода в области комбинированных решений по оптимизации процессов маршрутизации информационных потоков в ТКС, способных обеспечить должный уровень адаптации в зависимости от задаваемых требований к качеству процессов информационного обмена, объему циркулирующей служебной информации и т.д..

Сложность поставленных задач диктует необходимость применения для их решения целостного подхода, базирующегося на использовании системы математических моделей. Адекватно описать транспортную подсистему (ТПС) с системологических позиций можно с помощью следующей системы математических моделей:

- структурной модели, описывающей топологию ТКС, количество и взаимосвязь ее элементов;
- функциональной модели, отображающей процессы информационного обмена и управления в сети;
- информационной модели, определяющей характер передаваемых сообщений, их тип, приоритетность и качество предоставляемых услуг.

Структурную модель как результат морфологического описания транспортной подсистемы можно представить в виде ориентированного взвешенного графа $\Gamma(R, L)$, где множество вершин $R = \{R_i\}$, $(i = \overline{1, N})$ составляют маршрутизаторы, а N - общее их количество в ТПС; $L = \{L_{i,j}\}$, $(i, j = \overline{1, N}; i \neq j)$ - множество дуг, моделирующих цифровые тракты передачи информации между маршрутизаторами ТПС.

Высокий динамизм процессов информационного обмена и управления, протекающих в сети, определяет необходимость адекватного функционального описания ТПС только на основе соответствующих динамических моделей, при разработке которых может быть использован аппарат дифференциальных или разностных управляемых уравнений состояния [1,2]. Использование динамических моделей служит необходимым условием реализации любой стратегии маршрутизации - с одной стороны, расширяя область применения статической маршрутизации, а с другой, оправдывая затраты на использование адаптивной. Адаптивный характер маршрутизации позволяет достичь максимальной производительности сети, требуя, в свою очередь, существенных затрат временных, аппаратных и других сетевых ресурсов. Тем не менее, возможны ситуации, когда подобный подход изначально результативный в силу ряда причин становится неэффективным, например, вследствие снижения динамики поступающей нагрузки, приостановки различного рода дестабилизирующего воздействия, связанного с выходом из строя различных элементов ТПС. Поэтому дополнительным требованием к динамической функциональной модели является необходимость обеспечения учета возможности реализации в рамках единой ТПС различных маршрутных стратегий.

Для совместной реализации в сети статической и адаптивной маршрутизации на каждом i -м маршрутизаторе целесообразно иметь относительно постоянную статическую маршрутную таблицу $M_i^{cm} = \|a_{i,l}^j\|$ и периодически обновляемую динамическую маршрутную таблицу $M_i^o = \|u_{i,l}^j(k)\|$, где $a_{i,l}^j$ и $u_{i,l}^j(k)$ - доли пропускной способности тракта (i, l) , выделенные тра-

фику с адресом R_j в момент времени t_k и трактуемые в дальнейшем, соответственно, как статические и динамические маршрутные переменные. При этом результирующая маршрутная таблица $M_i = M_i^{cm} + M_i^d$.

В силу приведенных выше требований динамику информационного обмена можно представить в виде следующей системы неавтономных уравнений загрузки буферов очередей на маршрутизаторах ТПС:

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) - \sum_{\substack{g=1 \\ g \neq i}}^N a_{i,g}^j \cdot x_{i,j}(k) + \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i,j}}^N a_{r,i}^j \cdot x_{i,j}(k) - \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq i}}^N b_{i,l}(k) \cdot u_{i,l}^j(k) + \sum_{\substack{m=1, \\ m \neq i,j}}^N b_{m,i}(k) \cdot u_{m,i}^j(k) + y_{i,j}(k), \quad (1)$$

где $b_{m,i}(k) = c_{m,i}(k) \cdot \Delta t \cdot (1 - w_{m,i}^{cm})$; $y_{i,j}(k) = \zeta_{i,j}(k) \cdot \Delta t$; $k=0,1,2,\dots$; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$; $x_{i,j}(k)$ - объем данных, находящихся на маршрутизаторе R_i и предназначенных для передачи маршрутизатору R_j в момент времени t_k , трактуемый в дальнейшем как переменная состояния; $c_{i,j}(k)$ - скорость передачи данных от маршрутизатора R_i к маршрутизатору R_j в момент времени t_k в тракте (i,j) ; $w_{i,j}^{cm}$ - доля пропускной способности тракта (i,j) , выделенная для реализации статической маршрутизации; $\zeta_{i,j}(k)$ - интенсивность поступления данных на маршрутизатор R_i в момент времени t_k с адресатом R_j от пользователей сети; Δt - период перерасчета маршрутных переменных.

На переменные состояния и маршрутные переменные с целью предотвращения перегрузки элементов ТПС может быть наложен ряд ограничений. Ввиду ограниченности величины буферов очередей на маршрутизаторах ТПС, на переменные состояния накладываются минимаксные ограничения вида

$$0 \leq x_{i,j}(k) \leq x_{i,j}^{\max}, \quad (2)$$

где $x_{i,j}^{\max}$ - емкость буфера очереди для трафиков с адресатом R_j на коммутаторе R_i .

Вследствие ограниченности пропускных способностей цифровых трактов передачи на маршрутные переменные накладывается система ограничений вида

$$0 \leq a_{i,l}^j(k), \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{n=1, \\ n \neq i}}^N a_{i,l}^n(k) \leq w_{i,l}^{cm} \leq 1, \quad (4)$$

$$0 \leq u_{i,l}^j(k), \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{n=1, \\ n \neq i}}^N u_{i,l}^n(k) \leq (1 - w_{i,l}^{cm}), \quad (6)$$

где $(1 - w_{i,l}^{cm})$ - доля пропускной способности тракта (i,l) , выделенная для реализации адаптивной маршрутизации.

С целью описания динамики информационного обмена в ТПС в целом осуществим переход от скалярной системы уравнений (1), отражающих динамику отдельных очередей на маршрутизаторах сети, к ее векторно-матричному представлению

$$X(k+1) = A \cdot X(k) + B(k) \cdot U(k) + Y(k), \quad (7)$$

где A - матрица статической маршрутизации размерности $N \cdot (N-1) \times N \cdot (N-1)$, диагональные элементы которой можно представить как $A_{ii} = 1 - \sum_{\substack{g=1 \\ g \neq i}}^{N-1} a_{i,g}^r$, формируемая на основании статической маршрутной таблицы $M_i^{cm} = \|a_{i,l}^r\|$ каждого маршрутизатора; $X(k) = [x_{1,2}(k), \dots, x_{i,j}(k), \dots, x_{N,N-1}(k)]^T$ - вектор загрузки буферных устройств на маршрутизаторах транспортной подсистемы в момент времени t_k размерности $N \cdot (N-1)$; $U(k) = [u_{1,2}^2(k), \dots, u_{i,j}^j(k), \dots, u_{N,N-1}^{N-1}(k)]^T$ - вектор адаптивной маршрутизации размерности $N \cdot (N-1)^2$, компоненты которого представляют собой динамические маршрутные переменные, в соответствии с которыми в ТПС реализуется процесс адаптивной маршрутизации в момент времени t_k ; $B(k)$ - матрица пропускных способностей трактов между маршрутизаторами ТПС в момент времени t_k размерности $N \cdot (N-1) \times N \cdot (N-1)^2$, а ее элементы формируются в виде линейных комбинаций $b_{i,j}(k)$, исходя из выражения (1); $Y(k) = [y_{1,2}(k), \dots, y_{i,j}(k), \dots, y_{N,N-1}(k)]^T$ - вектор пользовательской нагрузки на маршрутизаторы ТПС в момент времени t_k размерности $N \cdot (N-1)$.

С помощью проведенного функционального описания ТПС удалось успешно формализовать процессы статической и адаптивной маршрутизации на основе их комбинации в рамках разработанной математической модели. Это стало возможным путем введения матриц статической маршрутизации A и вектора адаптивной маршрутизации U . В связи с тем, что нередко совершенствование той или иной модели при отмечаемых достоинствах сопровождается существенным усложнением ее дальнейшего исследования, дополним приведенные выкладки примером, подтверждающим целесообразность проведенной модификации.

Возможность применения разработанной модели рассмотрим на примере решения оптимизационной задачи нахождения динамических маршрутных переменных, используя в качестве целевого функционала

$$J = \sum_{k=0}^{v-1} [X^T(k) \cdot Q_X \cdot X(k) + U^T(k) \cdot Q_U \cdot U(k)] \rightarrow \min, \quad (8)$$

где Q_X - диагональная неотрицательно определенная весовая матрица, определяемая приоритетностью очередей на коммутаторах ТПС; Q_U - диагональная неотрицательно определенная весовая матрица, определяемая важностью цифровых трактов передачи данных в ТПС; v - количество интервалов Δt , для которых осуществляется расчет маршрутных переменных.

Подобная формулировка функционала (8) позволяет оценить суммарные аппаратные затраты маршрутизаторов по загрузке буферных устройств и затраты трактов передачи ТПС, связанных с загрузкой их пропускных способностей на протяжении цикла оптимизации $T = v \cdot \Delta t$.

Таким образом задача нахождения динамических маршрутных переменных сводится к решению оптимизационной задачи по минимизации векторного функционала (8) с учетом динамических ограничений (7), а также ограничений на переменные состояния и маршрут-

ные переменные (2), (3-6). Приведем решение этой вариационной задачи векторной оптимизации с помощью метода целевой координации [3], относящегося к классу иерархическо-координационных методов.

Решение исходной задачи минимизации функционала (8) в соответствии с методом целевой координации может быть заменено решением двойственной задачи максимизации по Λ функционала $\Phi(\Lambda)$. Двойственная задача определяется следующим образом:

$$\Phi(\Lambda) = \min_{x,u} L(X, U, \Lambda),$$

$$L(X, U, \Lambda) = \sum_{k=0}^{v-1} \{X^T(k) \cdot Q_X \cdot X(k) + U^T(k) \cdot Q_U \cdot U(k) + \lambda^T(k) \cdot [-X(k+1) + A \cdot X(k) + B(k) \cdot U(k) + Y(k)]\}, \quad (9)$$

где Λ - вектор множителей Лагранжа размерности $v \cdot N \cdot (N-1)$, состоящий из v векторов $\lambda(k)$; $L(X, U, \Lambda)$ - лагранжиан, образованный при введении условия (7).

Многоуровневый характер решения задачи позволяет обеспечить вычисление лагранжиана $L(X, U, \Lambda)$ для заданных на вышестоящем уровне $\Lambda = \Lambda^*$ независимо для каждого момента времени, определяемого индексом k . С этой целью определим гамильтониан

$$H(k) = X^T(k) \cdot Q_X \cdot X(k) + U^T(k) \cdot Q_U \cdot U(k) + \lambda^T(k) \cdot [A \cdot X(k) + B(k) \cdot U(k) + Y(k)]. \quad (10)$$

Тогда с учетом выражения (10) уравнение (9) принимает вид

$$L(X, U, \Lambda) = \min_{x,u} \sum_{k=0}^{v-1} [H(k) - \lambda^T(k-1) \cdot X(k)] = \sum_{k=0}^{v-1} L_k(\Lambda),$$

$$L_k(\Lambda) = \min_{x,u} [H(k) - \lambda^T(k-1) \cdot X(k)]. \quad (11)$$

С целью получения численного решения задачи необходимо рассчитать независимо друг от друга значения функций L_k для заданных $\Lambda = \Lambda^*$ и затем максимизировать $\Phi(\Lambda^*)$ с использованием градиентных процедур, где градиент функции $\nabla \Phi(\Lambda^*)$ представим в виде

$$\nabla \Phi(\Lambda) \Big|_{\Lambda = \Lambda^*} = \begin{bmatrix} -X^*(1) + A \cdot X^*(0) + B(0) \cdot U^*(0) + Y(0) \\ -X^*(k+1) + A \cdot X^*(k) + B(k) \cdot U^*(k) + Y(k) \\ -X^*(v) + A \cdot X^*(v-1) + B(v-1) \cdot U^*(v-1) + Y(v-1) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где X^*, U^* - решения, полученные после минимизации L_k для заданных значений $\Lambda = \Lambda^*$.

Задача минимизации L_k в выражении (11) в соответствии с ограничениями (2) и (3-6) является задачей параметрической оптимизации и решается методами математического (квадратичного) программирования.

Таким образом, решение оптимизационной задачи по минимизации целевого функционала (8) может быть представлено с помощью следующей двухуровневой процедуры. На нижнем уровне при заданных $\Lambda = \Lambda^*$ независимо друг от друга минимизируются функции L_k , $k = \overline{0, v-1}$ в выражении (11). Полученные решения X^*, U^* участвуют на верхнем уровне в расчете градиента (12), который, в свою очередь, применяется для нахождения вектора

Λ , максимизирующего Φ . Оптимум функционала J достигается при равенстве нулю градиента (12).

Пример решения маршрутной задачи, связанной с нахождением вектора динамических маршрутных переменных U , продемонстрировал относительную простоту и удобство исследования предложенной функциональной модели. Комбинированность решения заключается в возможности реализации в рамках единой ТПС одновременно стратегий статической и адаптивной маршрутизации. Это достигнуто за счет введения разграничивающего порога использования пропускных способностей отдельных трактов $w_{i,j}^{cm}$, позволившего разнести во времени расчет статических и динамических маршрутных переменных. Таким образом, предложенная функциональная модель ориентирует на организацию процесса маршрутизации в ТПС следующим образом: часть трафика передается в соответствии со статической таблицей маршрутизации, задаваемой матрицей A , рассчитанной заранее и сохраняемой длительное время без изменений, другая часть нагрузки передается по динамически формируемым маршрутам, для чего в процессе функционирования рассчитываются соответствующие маршрутные переменные как компоненты вектора $U(k)$.

Синтезированная модель обладает должной степенью общности и позволяет находить свое применение в широком спектре практических приложений. В прямой постановке адекватное описание достигается в случае, когда сетевая нагрузка распределяется как по статическому плану, так и по динамическому, что возможно при наличии априорной информации о статистических характеристиках входного трафика. Т.е. часть нагрузки, объем которой практически не изменяется, можно передавать с использованием статических маршрутных таблиц. Оставшаяся часть нагрузки, динамично изменяющаяся со временем, передается по адаптивно рассчитанным маршрутам с учетом динамики условий функционирования сети. Примером такой ситуации может служить организация процессов маршрутизации в гибридных сетях, где часть нагрузки передается по постоянным виртуальным соединениям (PVC), а часть по технологии коммутируемых виртуальных соединений (SVC) [2] или с помощью дейтаграмм, например, в соответствии с приведенным выше алгоритмом. Другим проявлением подобной ситуации может служить наличие в сети практически постоянного объема служебной информации и динамично изменяющегося трафика пользователей, когда имеет смысл использовать статически выделенную часть пропускной способности трактов передачи для обмена служебной информацией, а для пользовательских приложений маршруты доведения рассчитывать адаптивно.

Предложенная модель позволяет реализовать также и предельные случаи. При относительно низкой интенсивности входного трафика, а также при известных его статистических характеристиках возможны ситуации, когда реализация процесса адаптивной маршрутизации оказывается накладной, избыточной и в целом неэффективной. В этом случае процесс маршрутизации пользовательских информационных потоков носит преимущественно статический характер и под ее нужды выделяются все сетевые ресурсы ($w_{i,j}^{cm} = 1$), избавляя от необходимости расчета вектора адаптивной маршрутизации ($U = 0$). В противном случае, при высокой динамике входного информационного потока либо при отсутствии априорной информации о нем необходимым будет отказ от статических решений, мобилизовав все ресурсы ТПС для реализации адаптивной стратегии ($w_{i,j}^{cm} = 0$). Подобный вариант может быть представлен моделью (7) с введением единичной матрицы статической маршрутизации – $A = I$ [2,4].

Таким образом, представленная функциональная модель маршрутизации на основе заложенных в ней комбинированных решений обеспечивает сочетание в себе простоты статической и высокую степень адаптируемости динамической маршрутизации. Это позволяет в зависимости от уровня априорной информированности о характере входного трафика, объе-

мов передаваемой служебной информации и т.д. должным образом настроить предложенную модель путем задания матриц A и U , обеспечив тем самым условия для эффективного решения столь важных маршрутных задач.

Список литературы: 1. *Segall A.* The modeling of adaptive routing in data-communications networks // IEEE Trans. on communications, 1975. Vol. 25, №1. P.85-95. 2. *Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Гема Н.И.* Динамическая маршрутизация в пакетных сетях с гарантированным качеством обслуживания // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. № 123. С.45-50. 3. *Сингх М., Титли А.* Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. М.: Машиностроение, 1986. 494 с. 4. *Лемешко А.В.* Алгоритм иерархическо-координационного управления информационным обменом в сети передачи данных // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. тр. ХАИ. Вып. 1. Х.: ХАИ, 1998. С.323-328.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 13.02.2002